



XXXI Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica

Del 16 al 19 de noviembre del 2022, Guadalajara, Jal. México



Implementación de modelos analíticos para la interpretación de Ensayos de Respuesta Térmica (TRT)

Implementation of analytical models for interpreting Thermal Response Test (TRT)

Josué López-Garrido, Norma Patricia López-Acosta y David Francisco Barba-Galdámez
Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería (IIUNAM)

RESUMEN: El diseño eficaz de sistemas cerrados de Bombas de Calor Geotérmico requiere de la determinación de las propiedades térmicas del suelo. A nivel internacional, estos parámetros suelen medirse mediante un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT). Tradicionalmente, la interpretación de este tipo de ensayos se fundamenta en la aplicación de diferentes modelos analíticos de transferencia de calor. En el presente artículo se analiza la eficiencia de un programa denominado EVA-TRT, implementado en Python®, diseñado para la interpretación de TRTs con base en los modelos de Fuente Lineal e Infinita (ILSM) y Fuente Cilíndrica Infinita (ICSM). La aplicabilidad del algoritmo se evaluó utilizando datos experimentales de un TRT ejecutado en el Estado de México. Los resultados indican que el algoritmo propuesto es una herramienta eficiente y fácil de utilizar para la interpretación de ensayos TRT, por lo que representa un apoyo invaluable para el diseño y desarrollo de BCG en México.

ABSTRACT: Effective design of closed geothermal heat pump systems requires the determination of soil thermal properties. Internationally, these parameters are usually measured by a Thermal Response Test (TRT). Traditionally, the interpretation of this type of test is based on the application of different analytical models of heat transfer. This article analyzes the efficiency of a program called EVA-TRT, implemented in Python®, designed for interpreting TRTs based on the Infinite Linear Source (ILSM) and Infinite Cylindrical Source (ICSM) models. The algorithm applicability was evaluated using experimental data from a TRT executed in the State of Mexico. The results indicate that the proposed algorithm is an efficient and easy-to-use tool for interpreting TRTs and represents an invaluable tool for the design and development of BCGs in Mexico.

1 INTRODUCCIÓN

El uso excesivo de combustibles fósiles para la producción de energía es uno de los principales problemas ambientales que enfrenta el planeta, debido a que se liberan grandes cantidades de dióxido de carbono. Así, la necesidad de abastecer las necesidades humanas con un limitado impacto ambiental ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías que permitan aprovechar fuentes de energía renovables.

Una propuesta de uso de energías renovables consiste en emplear la energía térmica del subsuelo (energía geotérmica de baja entalpía) para el acondicionamiento de espacios con ayuda de Bombas de Calor Geotérmico (BCG), en particular empleando los sistemas cerrados denominados pozos intercambiadores de calor (GSHP, por sus siglas en inglés *Ground Source Heat Pump*) y las geoestructuras energéticas (de Moel *et al.*, 2010). Las BCG son máquinas térmicas capaces de transferir calor del subsuelo a la edificación o viceversa (Laloui y Di Donna, 2011; Abuel-Naga *et al.*, 2014). Durante el invierno las BCG utilizan el suelo como fuente de calor, mientras que en verano lo emplean como un disipador de calor.

En las BCG, la transferencia de calor se efectúa por medio de un fluido (generalmente agua) que circula a través un sistema cerrado de tuberías instalado dentro de una perforación en el suelo (intercambiador de calor). En los GSHPs, el intercambiador de calor consiste en pozos de pequeño diámetro perforados específicamente para alojar las tuberías, mientras que, en las geoestructuras energéticas, las tuberías se instalan dentro de los elementos de cimentación de la edificación (pilas, muros diafragma,

losas, etc.) (Brandl, 2016). En ambos casos, la transferencia de calor se lleva a cabo principalmente por conducción y convección, y conlleva los siguientes procesos (Abdelaziz *et al.*, 2011): 1) convección entre el fluido y el interior de la tubería, 2) conducción a través de la pared de la tubería, 3) conducción dentro del intercambiador de calor (pozo o elemento de cimentación), 4) conducción dentro del suelo *in situ*, y 5) convección a través del flujo de agua subterránea (si existe).

Para el diseño de los GSHPs y las geoestructuras energéticas es necesario realizar estudios preliminares en el sitio de interés para conocer las propiedades térmicas del suelo y determinar su respuesta durante los procesos de extracción/inyección de calor, así como los procesos geológicos del lugar y sus efectos en el campo de temperatura. Dichos estudios se realizan normalmente a través de un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT, por sus siglas en inglés *Thermal Response Test*). El Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) consiste en inyectar calor al suelo a una tasa constante y monitorear los cambios de temperatura producidos. Para ello, se hace circular un fluido caliente (usualmente agua) a través de tuberías incrustadas en un intercambiador de calor (p. ej. pozos o pilas) durante un periodo específico de tiempo. Al recorrer el sistema de tuberías, el fluido transfiere energía térmica al suelo que lo rodea y regresa a la superficie a una menor temperatura. Durante el ensayo, se registran las temperaturas de entrada y salida del fluido, el caudal y el consumo de energía (Sharqawy *et al.*, 2009).

Tradicionalmente, los registros de las pruebas TRT se interpretan utilizando diferentes modelos analíticos de

transferencia de calor por conducción en medios continuos (Loveridge *et al.*, 2014; Jensen-Page *et al.*, 2019). Así, las propiedades térmicas del suelo y del intercambiador de calor se estiman utilizando procedimientos de ajuste de curvas a través del criterio de mínimos cuadrados (Zhang *et al.*, 2021). El modelo más ampliamente utilizado es el de Fuente Lineal Infinita (ILSM, por sus siglas en inglés *Infinite Line Source Model*) (Carslaw y Jaeger, 1959), pero existen modelos más complejos que asemejan en mayor medida las condiciones reales de campo, como el modelo de Fuente Cilíndrica Infinita (ICSM, por sus siglas en inglés *Infinite Cylindrical Source Model*) (Ingresoll *et al.*, 1948) o el modelo de Fuente Lineal Finita (FLSM, por sus siglas en inglés *Finite Line Source Model*) (Zeng *et al.*, 2002).

En el presente artículo se analiza la eficiencia de un algoritmo numérico, implementado en Python® y denominado *EVA-TRT*, diseñado para la estimación de las propiedades térmicas de los suelos a partir de Ensayos de Respuesta Térmica (TRT). El código numérico permite determinar la conductividad (λ) y difusividad térmica (α) de los suelos utilizando dos de los modelos más utilizados en la práctica, Fuente Lineal Infinita (ILSM) y Fuente Cilíndrica Infinita (ICSM). La aplicabilidad del algoritmo se evaluó utilizando datos experimentales de un TRT ejecutado en el Estado de México (Rivera-Martínez, 2021). Las estimaciones obtenidas con el algoritmo propuesto se compararon con valores típicos indicados en la literatura para suelos similares a los encontrados en el sitio de estudio. Los resultados indican que el algoritmo propuesto es una herramienta eficiente y fácil de utilizar para la interpretación de ensayos TRT, por lo que representa un apoyo invaluable para el diseño y desarrollo de BCG en México.

2 PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS SUELOS

Las propiedades térmicas de los suelos permiten estimar la cantidad de calor que se puede extraer/inyectar en las BCGs. Al ser sistemas heterogéneos y polifásicos, la transferencia de calor en los suelos involucra múltiples procesos, entre los que destacan los mecanismos de conducción, convección y radiación (Alrtimi *et al.*, 2016). Pese a que la importancia de cada mecanismo depende de múltiples factores, en suelos saturados el mecanismo de transferencia dominante es la conducción (Loveridge, 2012).

La expresión matemática que describe la conducción de calor en suelos homogéneos e isótropos es:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

donde T es la temperatura del medio ($^{\circ}\text{C}$) y α es la difusividad térmica del suelo (m^2s^{-1}). La difusividad térmica representa la rapidez con la que el suelo responde a los cambios de temperatura y puede obtenerse como:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_s} \quad (2)$$

donde ρ es la densidad del suelo (kg m^{-3}), λ es su conductividad térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$) y c_s es su capacidad calorífica específica ($\text{J kg}^{-1} \text{C}^{-1}$). La conductividad térmica λ se define como la cantidad de calor que puede fluir a

través de una unidad de material por cada unidad de tiempo. Esta propiedad se ve altamente afectada por las condiciones del suelo tales como su composición mineralógica, densidad del material, porosidad, la existencia y propiedades químicas del agua en los poros. Por otra parte, la capacidad calorífica específica c_s se define como la cantidad de energía térmica que se puede acumular por cada unidad de cambio de temperatura (Rees *et al.*, 2000).

En la Tabla 1 se proporcionan valores típicos de las propiedades térmicas para diferentes tipos de rocas y suelos (Rawlings y Sykulski, 1999; Dalla Santa *et al.*, 2020).

Tabla 1. Propiedades térmicas de rocas y suelos comunes (adaptado de Rawlings y Sykulski, 1999; Dalla Santa *et al.*, 2020).

Material	Conductividad térmica ($\text{Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$)	Calor específico ($\text{kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$)	Densidad (g cm^{-3})
Granito	2.1 – 4.5	0.84	2.64
Caliza	1.4 – 5.2	0.88	2.48
Arenisca	1.4 – 5.2	0.71	2.24
Arcilla			
seca	0.2 – 1.5	0.8	----
húmeda	1.4 – 1.7	1.3 – 1.7	----
saturada	1.7 – 2.4	1.7 – 1.9	----
Arena			
seca	0.1 – 0.9	0.7	----
húmeda	1.0 – 2.6	1.2	----
saturada	2.1 – 2.6	1.7 – 1.9	1.44 – 1.92

3 MODELOS PARA LA INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE RESPUESTA TÉRMICA (TRT)

3.1 Generalidades

Si se considera que la tasa de inyección de calor por unidad de longitud q aplicada durante un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) es constante, las variaciones de temperatura registradas en el fluido que circula a través del intercambiador de calor pueden determinarse analíticamente como (Laloui y Rotta Loria, 2020):

$$T_f = T_{s,0} + q [R_b + G(t)] \quad (3)$$

donde $T_{s,0}$ es la temperatura no alterada del suelo (es decir, el campo de temperatura alejado de la fuente), R_b es la resistencia térmica del intercambiador de calor (mKW^{-1}) y $G(t)$ es una función dependiente del tiempo (t) y de las propiedades térmicas del suelo (conductividad térmica λ y difusividad térmica α), denominada función- g .

La Ec. (3) asume que el radio del intercambiador de calor r_b es pequeño comparado con el área de suelo y que, por tanto, la transferencia de calor dentro de él alcanza condiciones de flujo establecido relativamente rápido. Así, las variaciones de temperatura entre el fluido y la pared del intercambiador quedan definidas a partir del valor de R_b , el cual depende de la geometría del intercambiador, el número de tuberías instaladas, la velocidad de circulación del fluido y las propiedades térmicas de los materiales (Kavanaugh y Rafferty, 2014). Por otra parte, la función- g $G(t)$ considera la respuesta térmica transitoria del suelo en la periferia del intercambiador de calor y se determina aplicando diferentes

modelos analíticos de transferencia de calor como el de Fuente Lineal Infinita (ILSM) y el de Fuente Cilíndrica Infinita (ICSM) (Li y Lai, 2015).

3.2 Modelo de fuente lineal infinita (ILSM)

El modelo de fuente lineal infinita (ILSM) evalúa el proceso de transferencia de calor por conducción en un medio continuo homogéneo e isótropo ocasionado por una fuente de calor lineal e infinita. En estas condiciones, la ecuación diferencial que gobierna la transferencia de calor puede expresarse en coordenadas polares como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

donde r corresponde a la distancia radial a la fuente de calor (m).

Si se asume que la transferencia de calor es completamente radial (despreciando las pequeñas variaciones que puedan ocurrir en la dirección vertical) y que la tasa de transferencia por unidad de longitud es constante e igual a q (Wm^{-1}), las condiciones de frontera quedan definidas como:

$$\begin{cases} T(r \rightarrow \infty, t) = T_{s,0} \\ T(r, t = 0) = T_{s,0} \\ q(r \rightarrow 0, t) = \left(-2\pi\lambda \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = q \end{cases} \quad (5)$$

En estas condiciones, el cambio de temperatura en el medio ΔT puede determinarse como (Carslaw y Jaeger, 1959):

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi\lambda} E_1 \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) \quad (6)$$

donde $E_1(\cdot)$ es la función integral exponencial. Si se considera un valor de distancia radial r igual al radio del intercambiador de calor r_b , la función- g para una fuente lineal infinita $G_{ILSM}(t)$ puede escribirse como:

$$G_{ILSM}(t) = \frac{1}{4\pi\lambda} E_1 \left(\frac{r_b^2}{4\alpha t} \right) \quad (7)$$

Es posible simplificar la Ec. (7) considerando que, para valores pequeños del argumento x , la integral exponencial $E_1(x)$ puede aproximarse como (Abramowitz y Stegun, 1965):

$$E_1(x) \approx -\gamma - \ln(x) \quad (8)$$

donde γ es la constante de Euler, igual a 0.5772. Dicha condición se satisface para valores grandes de t . Así, el valor de $G_{ILSM}(t)$ puede calcularse como:

$$G_{ILSM}(t) = \frac{1}{4\pi\lambda} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] \quad (9)$$

3.3 Modelo de fuente cilíndrica infinita (ICSM)

El modelo de fuente cilíndrica infinita (ICSM) considera el proceso de transferencia de calor por conducción en un medio continuo homogéneo e isótropo ocasionado por una fuente cilíndrica hueca e infinita de radio r_b . Así, la ecuación diferencial que describe la transferencia de calor es idéntica a la Ec. (4) del modelo ILSM, siendo las nuevas condiciones de frontera:

$$\begin{cases} T(r \rightarrow \infty, t) = T_{s,0} \\ T(r, t = 0) = T_{s,0} \\ q(r = r_b, t) = \left(-2\pi r_b \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) = q \end{cases} \quad (10)$$

La solución propuesta por Ingersoll *et al.* (1948) para el cambio de temperatura en el medio ΔT bajo estas condiciones es:

$$\Delta T = \frac{q}{\pi^2 r_b \lambda} \int_0^\infty \left(e^{-\alpha u^2 t} - 1 \right) \frac{J_0(ur) Y_1(ur_b) - Y_0(ur) J_1(ur_b)}{u^2 [J_1^2(ur_b) + Y_1^2(ur_b)]} du \quad (11)$$

donde $J_0(\cdot)$ y $J_1(\cdot)$ se refieren a las funciones Bessel de primera especie de orden 0 y 1, mientras que $Y_0(\cdot)$ y $Y_1(\cdot)$ son las funciones Bessel de segunda especie de orden 0 y 1, respectivamente.

Si se considera un valor de distancia radial r igual al radio del intercambiador de calor r_b , la función- g para una fuente cilíndrica infinita $G_{ICSM}(t)$ puede escribirse como:

$$G_{ICSM}(t) = \frac{1}{\pi^2 r_b \lambda} \int_0^\infty \left(e^{-\alpha u^2 t} - 1 \right) \frac{J_0(ur_b) Y_1(ur_b) - Y_0(ur_b) J_1(ur_b)}{u^2 [J_1^2(ur_b) + Y_1^2(ur_b)]} du \quad (12)$$

De acuerdo con Li y Lai (2015), el valor de $G_{ICSM}(t)$ puede aproximarse para valores grandes de t como:

$$G_{ILSM}(t) = \frac{1}{4\pi\lambda} \left\{ \ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma + \frac{r_b^2}{2\alpha t} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma + 1 \right] \right\} \quad (13)$$

4 CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE MODELOS ANALÍTICOS EN LA INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE RESPUESTA TÉRMICA (TRT)

4.1 Principio de superposición

Los modelos descritos en el apartado 3 pueden aplicarse de manera directa cuando la tasa de transferencia de calor q aplicada durante un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) es constante. En la práctica, dicha suposición se considera válida si el coeficiente de variación de q es menor o igual $\pm 1.5\%$ (ASHRAE, 2007). No obstante, es común que, durante la ejecución de un TRT, q presente variaciones significativas a lo largo del tiempo ocasionadas por fluctuaciones en el suministro eléctrico (Loveridge *et al.*, 2014).

Por otra parte, en la actualidad los TRTs suelen incluir una fase de prueba adicional denominada etapa de recuperación. En esta se apaga el calentador eléctrico que suministra energía térmica al fluido y se continúa su circulación dentro del intercambiador de calor hasta que el suelo recupere su temperatura inicial (Low *et al.*, 2015). La incorporación de esta etapa permite reducir la incertidumbre asociada a la estimación de las propiedades térmicas de los suelos, además de brindar indicios de mecanismos de transferencia de calor diferentes a la conducción (p. ej. presencia de flujo de agua subterránea) (ECES, 2013; Loveridge *et al.*, 2014).

Las condiciones antes descritas pueden simularse analíticamente utilizando el principio de superposición (Zhang *et al.*, 2021). En este caso, las variaciones en la transferencia de calor q en el tiempo se descomponen en diferentes pulsos de valor constante y los cambios de temperatura se determinan sumando los efectos

individuales de dichos pulsos. Matemáticamente, el principio de superposición se puede expresar como:

$$\Delta T_n = \sum_{i=1}^n \Delta q_i G(t_i - t_{i-1}) \quad (14)$$

donde n es el punto en el tiempo en el que se evalúa el principio de superposición, Δq_i representa el cambio en la tasa de transferencia de calor al inicio del intervalo de tiempo i y t_i corresponde al tiempo en el cual se presenta cada uno de los impulsos (Li y Lai, 2015).

4.2 Criterio de mínimos cuadrados para la estimación de parámetros

La interpretación de los registros de un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) es un problema inverso. En este tipo de problemas los parámetros $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots\}$ de un modelo altamente no lineal $f(\mathbf{x}|\theta)$ se infieren con base en n observaciones (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$. (Tarantola, 2005). En general, se asume que el modelo es de la forma:

$$y = f(\mathbf{x}|\theta) + \epsilon \quad (15)$$

donde ϵ es un error aleatorio que se considera normalmente distribuido con media 0 y varianza σ^2 , $\epsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$. En este contexto, y es la variable dependiente y a $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots\}$ se les denomina variables regresoras.

Bajo el criterio de mínimos cuadrados no lineales, los estimadores de los parámetros $\hat{\theta}$ se determinan minimizando la suma de errores al cuadrado (SEC):

$$\hat{\theta} = \min_{\theta} SEC = \min_{\theta} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 \quad (16)$$

La Ec. (16) puede reescribirse en términos de las observaciones como:

$$\hat{\theta} = \min_{\theta} \sum_{i=1}^n [y_i - f(\mathbf{x}_i|\theta)]^2 \quad (17)$$

A la sumatoria de errores al cuadrado (SCE) se le conoce como función objetivo.

4.3 Implementación para interpretación de Ensayos de Respuesta Térmica (TRT)

En los Ensayos de Respuesta Térmica (TRTs) se utiliza la Ec. (3) como modelo de regresión, en donde la variable dependiente es la temperatura promedio del fluido (T_f) y la variable regresora es el tiempo (t). Así, en función de la información disponible en cada proyecto, el problema inverso consiste en determinar la conductividad térmica del suelo (λ), la difusividad térmica del suelo (α) o la resistencia térmica del intercambiador de calor (R_b).

La solución del problema de minimización establecido en la Ec. (17) tiene solución directa únicamente para modelos lineales. En el caso de modelos no lineales, como los discutidos en el apartado 3, se suelen utilizar métodos iterativos para la determinación de los estimadores. Entre los métodos más utilizados se encuentran el algoritmo de Nelder-Mead (Nelder y Mead, 1965), los métodos de máxima pendiente (Draper y Smith, 1998), de Levenberg-Marquardt (Marquardt, 1963), de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (Broyden, 1970) y los algoritmos de región de confianza (Yuan, 2015). En particular, el algoritmo de región de confianza reflexivo (*Trust Region Reflective Algorithm*) ha demostrado brindar resultados confiables en la interpretación de Ensayos de Respuesta

Térmica (TRT) (Li y Lai, 2012). Lo anterior debido a su robustez ante sistemas no convexos y mal condicionados (sensibles).

En el presente trabajo, se utilizó el algoritmo de región de confianza reflexivo como método de minimización para el programa de cómputo *EVA-TRT*. El programa *EVA-TRT* fue desarrollado en el lenguaje Python 3.8.8 ® y permite la interpretación de Ensayos de Respuesta Térmica utilizando los modelos de Fuente Lineal Infinita (ILSM) y Fuente Cilíndrica Infinita (ICSM).

La aplicabilidad del programa *EVA-TRT* se evaluó a utilizando datos experimentales de un TRT ejecutado en el Estado de México. Para valorar la bondad de ajuste, se utilizó el error estándar residual (RSE) definido como:

$$RSE = \sqrt{\frac{SEC}{df}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n-k-1}} \quad (18)$$

donde df son los grados de libertad para el cálculo de la SEC y k el número de parámetros a estimar. Este estadístico mide la distancia promedio entre las observaciones experimentales y los valores estimados. Valores bajos de RSE indican un mejor ajuste del modelo.

5 APLICACIÓN DEL PROGRAMA EVA-TRT A UN CASO REAL

5.1 Características generales del Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) analizado

En 2021, como parte de un programa de investigación de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) para la caracterización de las propiedades térmicas de los suelos nacionales, se llevó a cabo un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) en un campo experimental ubicado en Naucalpan, Estado de México. El ensayo se realizó en un pozo intercambiador de calor (GSHP) de 20 m de profundidad y 15 cm de diámetro, equipado con un bucle de tubería en U de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) y relleno con una mezcla de cemento, arena sílica y grafito amorfo, especialmente diseñada para el ensayo (Rivera-Martínez *et al.*, 2021).

Exploraciones geotécnicas efectuadas en la zona indican que la estratigrafía del sitio está compuesta por diferentes capas de arena limosa con limo y gravas (Rivera-Martínez, 2021). Previo a la realización del TRT, se midió la temperatura a cada metro de profundidad dentro del pozo de prueba. El perfil térmico del suelo elaborado (Figura 1) permitió estimar la temperatura no alterada del suelo $T_{s,0}$ en 22.8 °C.

El tiempo de realización del Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) fue de 7 días (aproximadamente 160 h) dividido en dos fases. La primera, correspondiente a la etapa de calentamiento, tuvo una duración de 3 días y medio (80 h) en la cual se inyectó calor al suelo a una tasa promedio de 65.36 W/m. Posteriormente, se apagó el calentador y se registró durante 80 h la variación de temperatura del suelo mientras retornaba a su condición original (etapa de recuperación).

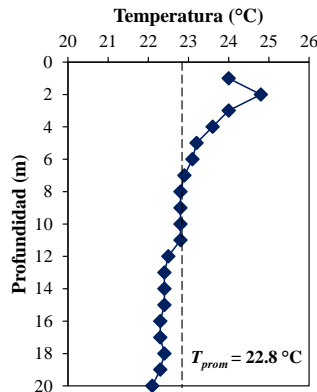


Figura 1. Perfil de temperatura del suelo en el sitio de estudio. Nota: T_{prom} = temperatura promedio.

La Figura 2 muestra la variación en el tiempo de la temperatura promedio del fluido (T_f) registrada durante el desarrollo del ensayo. Se observa que, al inicio de la prueba, la temperatura del fluido sufrió variaciones significativas hasta llegar a los 20 °C a las 25 h. A partir de este tiempo, el aumento en la temperatura se suavizó considerablemente, mostrando un cambio de pendiente. Terminada la etapa de calentamiento se puede apreciar un decaimiento de los valores de temperatura. Cabe resaltar que la temperatura del fluido no regresó a su valor inicial ($\Delta T = 0$ °C) debido a que el suelo conserva una parte de la energía térmica inyectada.

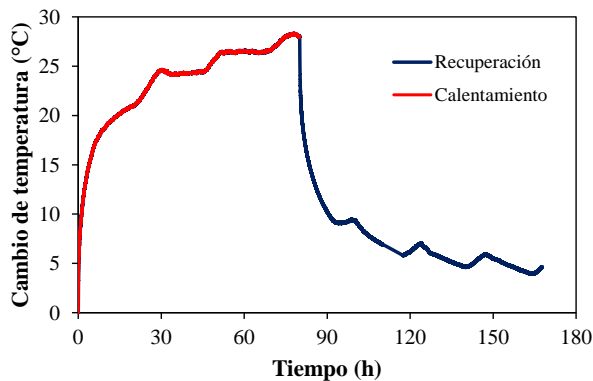


Figura 2. Gráfica de temperaturas de entrada, salida y promedio de la prueba.

5.2 Resultados obtenidos con programa EVA-TRT

El registro de datos del Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) se dividió en dos etapas (etapa de calentamiento y etapa de recuperación), las cuales fueron procesadas de manera independiente. La Tabla 1 muestra los resultados de conductividad térmica (λ) y difusividad térmica (α) obtenidos para cada etapa con los modelos de fuente lineal infinita (ILSM) y fuente cilíndrica infinita (ICSM). En ambos casos, el programa EVA-TRT exhibió una rápida convergencia y robustez durante la estimación de las propiedades térmicas de la prueba estudiada.

En general, las propiedades térmicas estimadas con ambos modelos (ILSM e ICSM) se encuentran dentro de los rangos publicados en la literatura internacional para arenas

secas (Tabla 1). Esto sugiere que el programa EVA-TRT es una herramienta eficiente y confiable para la interpretación de Ensayos de Respuesta Térmica (TRT).

Por otra parte, de la Tabla 2 se observa que, para ambos modelos, las conductividades térmicas estimadas en la etapa de recuperación son ligeramente superiores a las determinadas en la etapa de calentamiento. Esto ha sido observado previamente en otras investigaciones (Loveridge et al., 2014; Low et al., 2015) y se ha asociado a las variaciones de la tasa de transferencia de calor q durante la etapa de calentamiento. Pese a lo anterior, los valores de RSE sugieren que, tanto para el modelo ILSM como para ICSM, las estimaciones efectuadas en la etapa de calentamiento brindan un mejor ajuste a las curvas experimentales.

En las Figuras 3a y 3b se comparan los resultados experimentales (rojo) con los obtenidos del ajuste de curvas con el modelo ILSM (línea azul). En general, se observa que el modelo es capaz de reproducir adecuadamente las mediciones de campo, con excepción de algunos cambios de temperatura bruscos registrados en diferentes etapas del ensayo. Estas irregularidades son resultado de problemas de aislamiento térmico en las tuberías y reflejan las variaciones de temperatura ambientales que ocurren durante el día y la noche. De igual forma, se aprecia un buen ajuste entre el modelo ICSM y la temperatura medidas en campo (Figuras 4a y 4b).

Tabla 2. Propiedades térmicas obtenidas por los modelos aplicados.

Modelo	Etapas	Conductividad térmica ($Wm^{-1}C^{-1}$)	Difusividad térmica ($m^2 s^{-1}$)	RSE
Fuente lineal infinita (ILSM)	Calentamiento	0.82	5.86×10^{-6}	0.471
	Recuperación	0.88	2.67×10^{-6}	0.855
Fuente cilíndrica infinita (ICSM)	Calentamiento	0.82	5.5×10^{-6}	0.613
	Recuperación	0.96	5.88×10^{-5}	0.801

Finalmente, se observa que no existe mayor diferencia entre las estimaciones efectuadas con los modelos ILSM e ICSM. Lo anterior sugiere que ambos modelos pueden ser aplicados para la interpretación de TRTs. Sin embargo, se sugiere siempre elegir el modelo que mejor se adapte a las condiciones de campo.

6 CONCLUSIONES

La estimación adecuada de las propiedades térmicas de los suelos es fundamental en el diseño de pozos intercambiadores de calor (GSHP) y geoestructuras energéticas. Los Ensayos de Respuesta Térmica (TRT) son uno de los métodos más utilizados para la determinación de estos parámetros, ya que permiten evaluar volúmenes representativos de suelo en condiciones reales de campo. En el presente artículo se evaluó la eficiencia de un método numérico basado en mínimos cuadrados no lineales y el algoritmo de región de confianza reflexivo para la estimación automática de la conductividad y difusividad térmica de suelos a partir de TRTs.

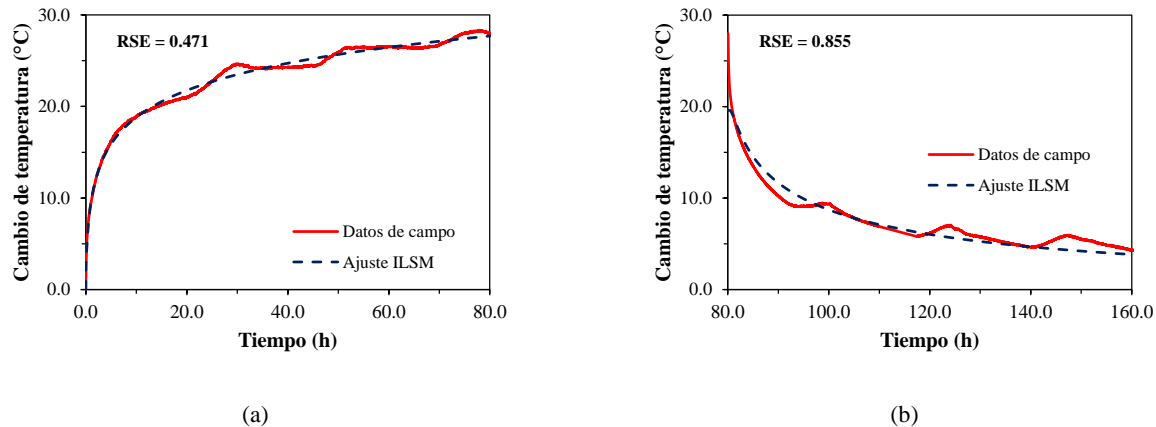


Figura 3. Comparación de datos experimentales y ajuste con el método de fuente lineal infinita (ILSM): a) etapa calentamiento, y b) etapa de recuperación

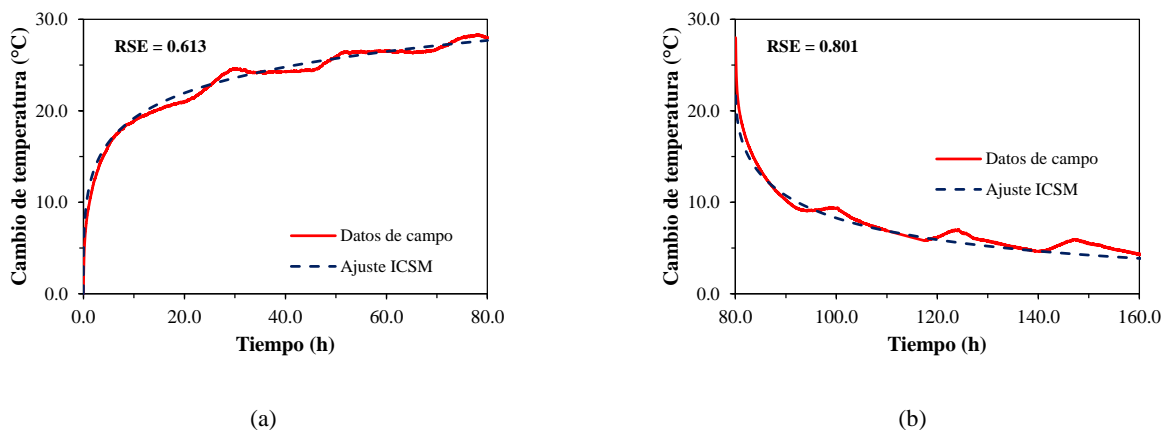


Figura 4. Comparación de datos experimentales y ajuste con el método de fuente cilíndrica infinita (ICSM): a) etapa calentamiento, y b) etapa de recuperación

El algoritmo analiza los registros de temperatura de los TRTs con base en los modelos de transferencia de calor de Fuente Lineal Infinita (ILSM) y de Fuente Cilíndrica Infinita (ICSM). Dicho procedimiento se automatizó en un programa de cómputo denominado *EVA-TRT*, desarrollado en lenguaje Python®. La aplicabilidad y robustez del programa desarrollado se evaluó utilizando datos de un Ensayo de Respuesta Térmica (TRT) ejecutado en Naucalpan, Estado de México.

Los resultados indican que *EVA-TRT* es una herramienta eficiente, confiable y fácil de utilizar para la estimación de propiedades térmicas de suelos. Asimismo, al comparar los resultados obtenidos con ambos modelos (ILSM y ICSM) se determinó que ambos presentan tendencias similares por lo que pueden ser aplicados al análisis de TRTs.

REFERENCIAS

- Abdelaziz, S., Olgun, C., y Martin, J. (2011). "Design and operational considerations of geothermal energy piles". En: Han J. y Alzamora D. (Ed.) *Proceedings of Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering*, 211, 450-459.
- Abramowitz, M. y Stegun, I.A. (1965). *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*. National Bureau of Standards, Nueva York.
- Abuel-Naga, H., Imad N. Raouf, M., Raouf, A., y Nasser, A. (2014). "Energy piles: current state of knowledge and design challenges". *Environmental Geotechnics*, 195-210.
- ASHRAE (2007). *ASHRAE handbook – heating, ventilating and air-conditioning applications*. American

- Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- Broyden, C. G. (1970), "The convergence of a class of double-rank minimization algorithms". *Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications*, 6: 76–90.
- Carslaw, H.S. y Jaeger, J.C. (1959). "Conduction of Heat in Solids", Oxford University Press.
- Dalla Santa, G., Galgaro, A., Sassi, R., et al. (2020). "An updated ground thermal properties database for GSHP applications". *Geothermics*, 85:101758.
- de Moel, M., Bach, P. M., Bouazza, A., Singh, R. M., y O. Sun, J. (2010). "Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (9), 2683-2696.
- Draper, N. R. y Smith, H. (1998). *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons, Nueva York.
- ECES (2013). *Annex 21 Thermal Response Test. Final report*.
- Eskilson, P. (1987). "Thermal analysis of heat extraction boreholes". Tesis doctoral, Universidad de Lund, Suecia.
- Ingersoll, L. R., Zobel, O. J., e Ingersoll, A. C. (1954). *Heat Conduction with Engineering, Geological and Other Applications* (325 p). McGraw-Hill.
- Jensen-Page, L., Loveridge, F., y Narsilio, G. A. (2019). "Thermal response testing of large diameter energy piles". *Energies*, 12(14), 1–25.
- Laloui, L., y Di Donna, A. (2011). "Understanding the behaviour of energy geo-structures". *Proceedings of the Institution of Civil Engineering*, 164(4), 184-191.
- Laloui, L., y Rotta Loria, A. F. (2020). *Analysis and Design of Energy Geostrutures. Theoretical Essentials and Practical Application*. Academic Press.
- Li, M., y Lai, A. C. (2012). "Parameter estimation of in-situ thermal response tests for borehole ground heat exchangers". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(9): 2615-2624.
- Li, M., y Lai, A. C. (2015). "Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales". *Applied Energy*, 151: 178- 191.
- Loveridge, F., Powrie, W., y Nicholson, D. (2014). "Comparision of two different models for pile thermal response test interpretation". *Acta Geotechnica*, 9(3), 367-384
- Loveridge, F., Low, J., y Powrie, W. (2017). "Site investigation for energy geostructures". *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 50 (2), 158-168.
- Low, J.E, Loveridge, F.A, Powrie, W., y Nicholson, D. (2015). "A comparison of laboratory and in situ methods to determine soil thermal conductivity for energy foundations and other ground heat exchanger applications". *Acta Geotechnica*, 10(2):209-218.
- Marquardt, D.W. (1963). "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters". *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2): 431-441.
- Nelder, J.A., y Mead, R. (1965). "A simplex method for function minimization". *The computer journal*, 7 (4): 308-313.
- Rawlings, R., y Sykulski, J. (1999). "Ground source heat pumps: A technology review". *CIBSE A: Building Serv. Eng. Res. Technol.* 20(3), 119-129.
- Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M., & Thomas, H. R. (2000). "Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures", *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 4(3): 213-265.
- Rivera-Martínez, A.M. (2021). "Diseño e implementación de un equipo de respuesta térmica (TRT) para la determinación de las propiedades térmicas de los suelos". (Tesis de Maestría) Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Rivera-Martínez, A.M., López-Acosta, N.P. y Barba-Galdámez, D.F. (2021) "Estudio de diferentes mezclas para rellenos en ensayos de respuesta térmica (TRT)". *XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, Plataforma Online.
- Sharqawy, M.H., Mokheimer, E.M., Habib, M.A., Badr, H.M., Said, S.A., Al-Shayea, N.A. (2009). "Energy, exergy and uncertainty analyses of the thermal response test for a ground heat exchanger". *Energy Research*, 33: 582-592.
- Tarantola, A. (2005). *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Filadelfia.
- Yuan, Y. (2015). "Recent advances in trust region algorithms". *Mathematical Programming*, 151: 249–281.
- Zhang, X., Han, Z., Ji, Q., Zhang, H., y Li, X. (2021). "Thermal response tests for the identification of soil thermal parameters: A review". *Renewable Energy*, 173, 1123–1135.